



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ PRO FDM TISK S PŘÍMĚSÍ DŘEVA

PROPERTIES OF WOOD COMPOSITE MATERIALS FOR FDM PRINTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Uvíra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Dominik Uvíra**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vlastnosti kompozitních materiálů pro FDM tisk s příměsí dřeva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor zpracuje v úvodní části řešerši problematiky 3D fdm tisku se zaměřením na využití kompozitních materiálů s příměsí dřeva. Následně navrhne experimenty pro vyhodnocení vlivu vybraných parametrů tisku na vytýpované vlastnosti vyrobeného dílu. Součástí práce bude i vyhodnocení výsledků a doporučení autora pro aplikaci kompozitních materiálů s příměsí dřeva v praxi.

Cíle bakalářské práce:

- řešerše zvolené problematiky
- návrh experimentální části
- vyhodnocení experimentální části
- technicko–ekonomické zhodnocení a doporučení autora

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se v první části zabývá řešením 3D FDM tisku, kompozitních materiálů s příměsí dřeva a jejich srovnání s běžnými materiály pro 3D FDM tisk. Druhá část této práce je zaměřena na návrh experimentů pro vyhodnocení vlivu vybraných parametrů tisku na vytypované vlastnosti vyrobeného dílu a jejich zhodnocení.

Klíčová slova

3D tisk, FDM tisk, materiály pro FDM tisk s příměsí dřeva, PLA s příměsí dřeva

ABSTRACT

The first part of this bachelor's thesis covers the research of 3D FDM printing, wood-filled composite materials and a comparison between them and typically used materials for 3D FDM printing. The second part of this thesis is focused on designing experiments to evaluate various print parameters and their effects on the printed part.

Key words

3D printing, FDM printing, wood-filled materials used for FDM printing, wood-filled PLA

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

UVÍRA, Dominik. *Vlastnosti kompozitních materiálů pro FDM tisk s příměsí dřeva* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131885>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vlastnosti kompozitních materiálů pro FDM tisk s příměsí dřeva** vypracoval(a) samostatně, pod odborným vedením Ing. Oskara Zemčíka, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Dominik Uvíra

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Oskarovi Zemčíkovi Ph.D. za odborné rady, pomoc a vedení závěrečné práce.

OBSAH

OBSAH.....	7
ÚVOD	8
1 3D TISK	9
1.1 3D FDM tisk.....	10
1.2 Materiály pro FDM tisk	11
1.2.1 PLA	11
1.2.2 PETG	12
1.2.3 ABS.....	12
1.2.4 ASA.....	12
1.2.5 TPU.....	12
2 MATERIÁLY S PŘÍMĚSÍ DŘEVA PRO 3D TISK	14
2.1 Výroba materiálů s příměsí dřeva.....	14
2.2 Vliv množství dřeva ve filamentu na vlastnosti 3D tištěných dílů.....	14
2.3 Vliv charakteristik dřevěných přísad na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů	17
2.4 Volba filamentu pro testování	17
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	18
3.1 Vliv vybraných tiskových parametrů na vytypované vlastnosti dílu.....	18
3.1.1 Vliv teploty tisku na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu	19
3.1.2 Vliv teploty tisku na stringování	21
3.1.3 Vliv teploty tisku na přemostňování	22
3.1.4 Vliv teploty tisku na barvu dílu	23
3.1.5 Vliv teploty tisku na pevnost v tahu, srovnání s PLA/PHA.....	24
3.1.6 Vliv rychlosti tisku na rozměrovou přesnost	31
3.2 Povrchové úpravy.....	33
3.2.1 Broušení.....	33
3.2.2 Olejování.....	34
3.3 Vyhodnocení experimentální části a technologicko-ekonomické zhodnocení	35
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	43

ÚVOD

Dřevo je jedním z nejvšestrannějších materiálů na světě. Má širokou škálu využití jako například nástroje, obydli, nábytek, zdroj tepla, dekorace a podobně. Z důvodu rostoucího nedostatku přírodních zdrojů byly na začátku devadesátých let minulého století vytvořeny kompozitní materiály tvořené dřevem a termoplasty.

Později se tyto materiály dostaly i k technologii 3D tisku. Technologie 3D tisku se neustále rozvíjí a s tím přicházejí i nové speciální materiály, jako je právě PLA (kyselina polymléčná) s příměsí dřeva, kterým se zabývá tato bakalářská práce. Největší výhoda tohoto materiálu v 3D tisku spočívá v možnosti výroby dílů, které je nemožné tradičními metodami vyrobit ze dřeva. Stejně jako ostatní speciální materiály má PLA s příměsí dřeva relativně úzké využití a vysokou pořizovací cenu a jsou proto využívány méně než běžné materiály. To vede k menšímu množství dostupných informací o těchto materiálech a vlivu tiskových parametrů na jejich vlastnosti.

Materiály s příměsí dřeva jsou atraktivní díky jejich vzhledu a jednoduchosti tisku. Je možné relativně snadno získat produkty, které by ze dřeva nikdy vyrobit nešlo. Nejběžněji jsou používány k výrobě dekorativních předmětů či hraček (viz obr. 1).

Výhodou těchto materiálů je, že je lze oproti ostatním speciálním materiálům tisknout na všech tiskárnách bez jakýchkoliv úprav, jako jsou například ocelové trysky.



Obr. 1 Hračka vyrobená z PLA s příměsí dřeva [27].

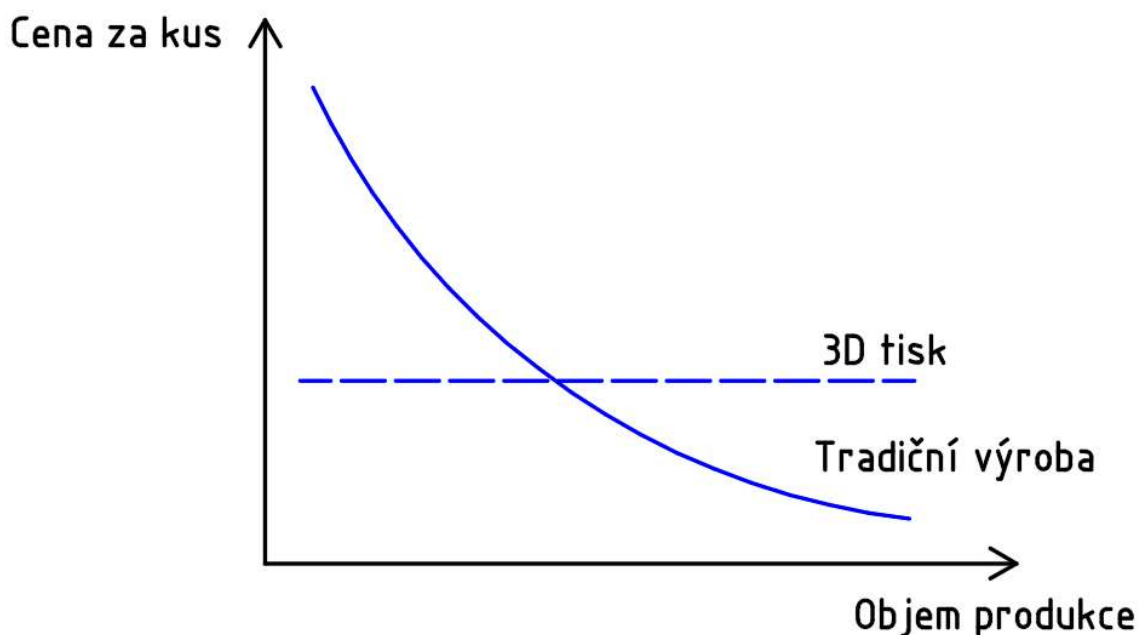
1 3D TISK

3D tisk je metoda aditivní výroby široké škály dílů s jednoduchou i komplexní geometrií, při které se z digitální předlohy vytváří fyzický model. Výrobek vzniká nanášením materiálu na sebe vrstvu po vrstvě, čímž je umožněna tvorba náročných tvarů s využitím méně materiálu než tradiční metody výroby [1, 2, 3].

Tvorba modelu pro tisk je jednoduchá, z libovolného CAD modeláře je model exportován ve formátu STL a poté ve sliceru (program pro rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy a nastavení tiskových parametrů) převeden na G-Code, který dává tiskárně příkazy o pohybu a teplotě tisku [2, 3].

Vzhledem ke krátkému času výroby a nízké ceně byl 3D tisk zprvu využíván na výrobu prototypů. Díky levnějším technologiím přišla i další využití, a to především malosériová výroba. Plánuje-li firma sérii produktů, která je příliš malá na zdůvodnění vysokých prvotních nákladů na přípravu výroby, je 3D tisk těchto produktů často levnější (viz graf 1.1). Výhodou je také velmi snadná a levná úprava produktu po obdržení zpětné vazby od zákazníka. Stačí jen upravit 3D model a tisknout novou verzi. Další výhodou 3D tisku je vznik minimálního množství odpadního materiálu [2, 5].

Kromě komerčního využití se díky nižším cenám a lepším materiálům pro tisk staly 3D tiskárny během posledních deseti let taky častou součástí domácích dílen pro výrobu nedostupných náhradních dílů, nebo jen jako hobby [6].



Graf 1.1 Porovnání 3D tisku a tradičních metod výroby v závislosti ceny výrobku na množství vyrobených kusů.

1.1 3D FDM tisk

FDM (Fused Deposition Modelling) tisk je nejznámější metoda 3D tisku. Při tisku metodou FDM je k tištění dílů používán polymer termoplastu ve formě tenkého drátu, nazývaný filament. Filament je namotán v cívce, která bývá zavěšena nad rámem tiskárny. Z cívky se materiál zavádí do tiskárny, kde je tlačén k tiskové hlavě. Součástí tiskové hlavy je topné těleso, které materiál nataví do polotekutého stavu, ve kterém je poté tryskou nanášen na tiskovou podložku. K tisku dalších vrstev se buď tisková podložka zasouvá směrem dolů, nebo se konstrukce nesoucí tiskovou hlavu posouvá směrem vzhůru. Pro dosažení lepší přilnavosti mezi první vrstvou a podložkou je pro některé materiály nutné použití vyhřívané podložky. Bez jejího použití může při chladnutí prvních vrstev dojít k jejich smrštění, což vede k odlepení celého dílu a selhání tisku. Typický průběh tvorby 3D tištěného dílu je 1. tvorba CAD modelu, 2. export STL souboru, 3. generování G-Codu ve sliceru, 4. tisk modelu [1, 2, 5, 8].

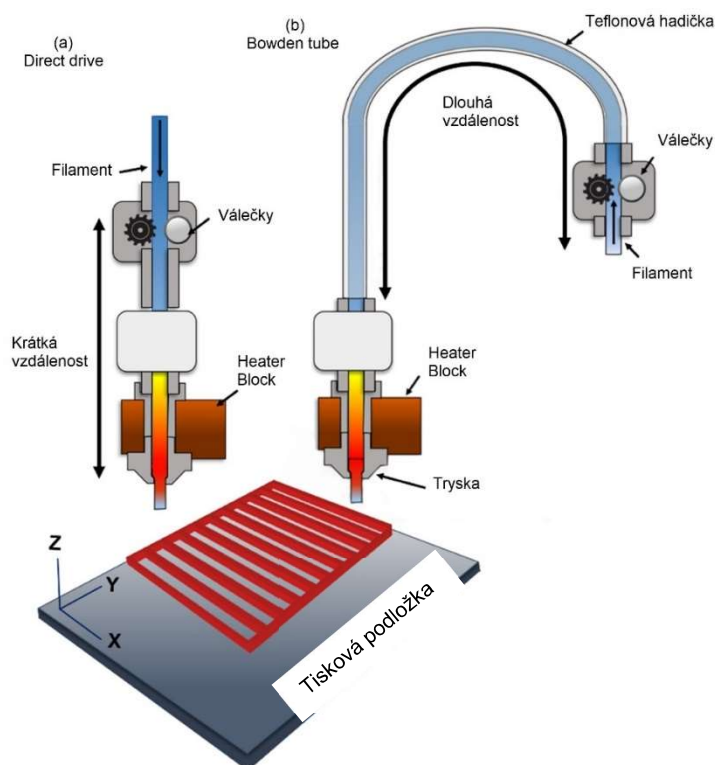
Pro FDM technologii jsou nezbytné vlastnosti termoplastů, které umožňují filamentu spojit jednotlivé vrstvy během tisku a poté v pokojové teplotě ztvrdnout. Mechanické vlastnosti výrobku ovlivňuje především šířka a výška jednotlivých vrstev, orientace modelu a teplota tisku. Rozměrová přesnost výrobku závisí na rychlosti tisku a použitém materiálu [1, 5, 7].

3D FDM tiskárny lze podle typu extruderu rozdělit do dvou základních kategorií, (a) Direct drive, ve kterém je plnicí mechanismus umístěn přímo na tiskové hlavě, a (b) Bowden tube, kde je plnicí mechanismus přimontován k rámu tiskárny a filament je do tiskové hlavy tlačén skrz teflonovou hadičku (viz obr. 1.1). Výhodou Direct drive je, že na tiskárnách vybavených tímto extruderem lze tisknout širší škálu materiálů. Nevýhodou je zvýšená hmotnost tiskové hlavy, což vede k nutnosti zajistit konstrukci nesoucí tiskovou hlavu z obou stran k rámu tiskárny. To se projevuje především na ceně tiskáren disponujících tímto extruderem. Tiskárny s Bowden tube extrudery mají typicky zajištěnou pouze jednu stranu konstrukce nesoucí tiskovou hlavu. Toto řešení je používáno především u levných hobby tiskáren [8].

Při tisku složitých tvarů, převisů, přemostění nebo vnitřních dutin je často nezbytné využití podpěr. Při tvorbě modelu je vhodné potřebu pro podpěry minimalizovat, jelikož jsou složité na odstranění a povrch součástí, který se dotýkal podpěry je hrubý. Taktéž se spotřebovává více materiálu, který pak končí jako odpad [2, 5, 9].

Hlavními výhodami FDM tisku jsou nízká cena, vysoká rychlost při výrobě malého množství dílů, jelikož vypadává nutnost výroby forem, zadání výroby, výroba testovací série a další procesy. Dalšími přednostmi jsou jednoduchost a minimální množství odpadního materiálu [1].

Na druhou stranu nevýhodami jsou nízké mechanické vlastnosti dílů, viditelnost jednotlivých vrstev a limitovaná nabídka termoplastů. Při výrobě velkého množství dílů je ve srovnání s běžnými metodami výroby plastových dílů jako je například vstřikování tato metoda pomalá [1].



Obr. 1.1 Rozdíl mezi direct drive a Bowden tube extrudery – podle [8].

1.2 Materiály pro FDM tisk

Pro FDM tisk je možné využít řadu materiálů. Liší se od sebe v mechanických vlastnostech, obtížnosti tisku či jejich schopnosti tisknout details. Některé z materiálů mají speciální vlastnosti, jako například průhlednost PETG nebo ohebnost TPU. Tyto vlastnosti se odráží na ceně jednotlivých materiálů. Prodávají se většinou v průměru struny 1,75 mm, ovšem v minulosti byl populární i průměr 2,85 mm, který se v posledních letech přestává používat z důvodu horší kvality tištěných dílů a nižší rozměrové přesnosti.

1.2.1 PLA

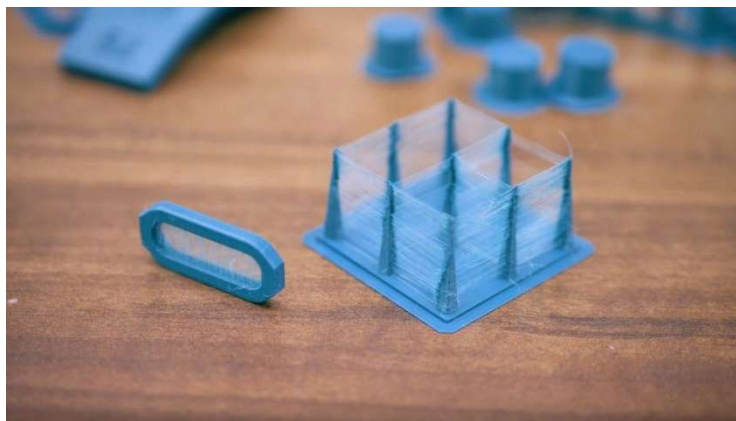
Neboli kyselina polymléčná (polyactic acid) je vyráběn z obnovitelných zdrojů, a to z kukuřičného škrobu a cukrové třtiny. Jedná se o nejčastěji používaný materiál pro FDM tisk. Jeho přednostmi jsou snadný tisk, pevnost, biologická odbouratelnost, malá tepelná roztažnost a téměř nulová deformace během tisku. Cenově je jedním z nejlevnějších, což také přispívá k jeho popularitě. Je dostupný v nejširší škále barev a variant, například mramor, karbon nebo dřevo. Hlavními nevýhodami tohoto materiálu jsou křehkost, nízká teplotní odolnost – začíná měknout už při 50 °C, obtížný post-processing a nestabilita při dlouhodobém působení UV záření [9,10].

Mezi možnosti využití patří držáky, šperky, hračky, dekorace a předměty s dobrou rozměrovou přesností. Vzhledem k UV nestabilitě a nízké tepelné odolnosti je nevhodný pro venkovní užití [10, 11].

1.2.2 PET-G

Polyethylentereftalát (PET) je nejpoužívanější plast na světě – láhve, nádoby a obaly na potraviny, oděvní vlákna. PET-G je upravený PET, kde “G” označuje modifikovaný glykol. Vláknem je méně křehké a používá se snadněji než základní forma PET. Je typický vyšší teplotní odolností, snadným tiskem, houževnatostí a pevností. Dobře se brousí a neabsorbuje vodu. Nevýhodou je náchylnost ke stringování – tvorbě vlásečnic při tisku (viz obr. 1.2) [12, 13].

Je vhodný na výrobu držáků, mechanicky namáhaných částí a díky téměř dokonalé přilnavosti vrstev i na vodotěsné díly [14].



Obr. 1.2 Ukázka stringování [14].

1.2.3 ABS

ABS neboli akrylonitril butadien styren byl jedním z prvních používaných materiálů pro 3D tisk. Tištěné díly mají podobné vlastnosti jako díly vyrobené pomocí vstřikování, a to vysokou rozměrovou přesnost, odolnost a opakovatelnou použitelnost. Mezi přednosti ABS patří dobrá ohybová pevnost, tvrdost, odolnost vůči nárazu a vysoká teplota tání. Také jej lze vyhladit acetonem a je zdravotně nezávadný. Největší nevýhodou tohoto materiálu je náročný tisk. Při tisku zapáchá a kvůli vysoké teplotě roztavnosti se při chladnutí může zmenšit až o 2 %. To způsobuje kroucení a praskání výrobku ještě před jeho dokončením. Aby se těmto jevům předešlo, je nutné tisknout na vyhřívanou podložku a tiskárnu umístit do izolované místnosti, kde nebude docházet k prudkým změnám teplot [15,16,17].

Využívá se zejména na funkční prototypy a malosériovou výrobu [15].

1.2.4 ASA

ASA (Akrylonitril styren akrylát) lze považovat za nástupce ABS. Oproti ABS je UV stabilní, méně se smršťuje při tisku a zápach při tisku je také menší. Všechny ostatní vlastnosti sdílí s ABS, včetně možnosti vyhlazení acetonem [18].

1.2.5 TPU

Hlavní charakteristikou těchto materiálů je ohebnost. Jsou vyrobeny z termoplastických elastomerů (TPE), což jsou sloučeniny tvrdých plastů a gumy. V 3D tisku je nejpoužívanější termoplastický polyuretan (TPU). Elasticita závisí na

chemickém složení použitým konkrétním výrobcem. Některé filamenty mohou být pouze částečně flexibilní jako pneumatiky, nebo úplně flexibilní jako gumičky. Dobře tlumí nárazy a vibrace [19,20].

Běžně se využívají na obaly mobilních telefonů nebo protiskluzové rukojeti [18].

2 MATERIÁLY S PŘÍMĚSÍ DŘEVA PRO 3D TISK

Pro biologicky odbouratelné materiály pro 3D tisk existuje velký zájem, což zahrnuje testování a vývoj ekologicky šetrných a recyklovaných materiálů. To se nevztahuje pouze na dřevo, ale i na celulózu, cukry nebo lignin. Klíčem k tvorbě těchto materiálů je nadrtit přísady do vhodného tvaru a velikosti, aby mohl být smíchán se základním materiálem. V současnosti jsou komerčně dostupné téměř výhradně kompozitní materiály na bázi PLA. Důvodem je dobrá povrchová přilnavost mezi přídatným biologickým materiálem a mřížkou PLA. První materiály s příměsí dřeva pro 3D tisk se na trhu objevily v roce 2012. Zprvu byly filamenty na bázi PLA smíchaným s dřevěnými pilinami. Experimenty ale ukázaly, že se nejedná o dobré řešení kvůli nedostatečným mechanickým vlastnostem výrobků, obtížnému tisku a ucpávání trysky tiskárny. V současnosti jsou tyto materiály stále tvořeny základním PLA, ale dřevo je přidáváno ve formě vláken. Dostupné jsou filamenty s několika druhy dřeva, nejčastěji to jsou bříza, bambus, cedr a borovice. Všechny materiály s příměsí dřeva jsou určeny hlavně na dekorativní, málo namáhané výrobky, jelikož mají horší mechanické vlastnosti než běžné materiály pro 3D tisk. Poměr PLA a dřeva je většinou 70 hm. % PLA a 30 hm. % dřeva. Nově se začínají vyrábět i materiály, které vzhled dřeva pouze imitují a žádné přitom neobsahují, jejich výhodou je, že neucpávají trysku. Výrobky z těchto filamentů imitují vzhled skutečného dřeva a lze je brousit, lakovat a barvit [21,22,23].

Výrobky z těchto filamentů imitují vzhled skutečného dřeva a lze je brousit, lakovat a barvit. Na dotek lze poznat, že se jedná o plast. Při natavování filamentu během tisku lze cítit vůni dřeva. Ve srovnání s běžnými materiály pro 3D tisk jsou velmi křehké.

2.1 Výroba filamentů s příměsí dřeva

Filamenty jsou vyráběny pomocí šnekových extruderů z granulí, prášku či drtě. Pro výrobu použitelných filamentů je potřeba připravit velmi jemné částice dřeva, jelikož i proseté částice o velikosti menší než 250 μm způsobují časté ucpávání trysky v průběhu tisku. Dále musí být do základního materiálu kromě dřevěných částic přidány i přípravky pro zlepšení houževnatosti a přilnavosti mezi základním materiálem a částicemi dřeva, jelikož kompozity pouze s dřevem jsou extrémně křehké a filament z nich vyrobený se při tisku láme, ucpává trysku tiskárny a výrobky z něj mají nedostatečné mechanické vlastnosti. Vhodným přídatkem pro tento účel je TPU.

Při výrobě může dojít ke shlukování dřevěných částic ve filamentu. Tomu lze typicky předejít vytlačováním filamentu pomocí dvoušnekového extruderu a následným opakovaným vytlačováním jednošnekovým extruderem, což vede k homogenizaci materiálu a tím pádem k předejití shlukování. Finální vlastnosti materiálu z velké části závisí i na procesu výroby a výrobních podmínkách. [41,42,43]

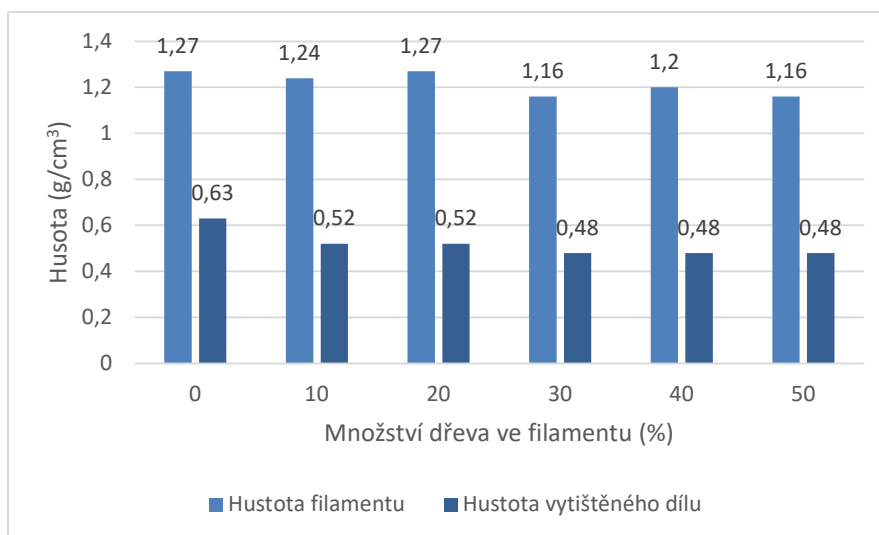
2.2 Vliv množství dřeva ve filamentu na vlastnosti 3D tištěných dílů

Výrobci nabízí PLA s 10 hm. % až 50 hm. %. Množství dřeva obsaženého v materiálu má vliv na jeho finální vzhled i mechanické vlastnosti, kterými se zabývá tato kapitola [24].

Hustota filamentu s rostoucím podílem dřeva klesá (viz graf 2.1). Tento výsledek je očekávaný, vzhledem k tomu, že hustota čistého PLA je přibližně 1,24 g/cm³

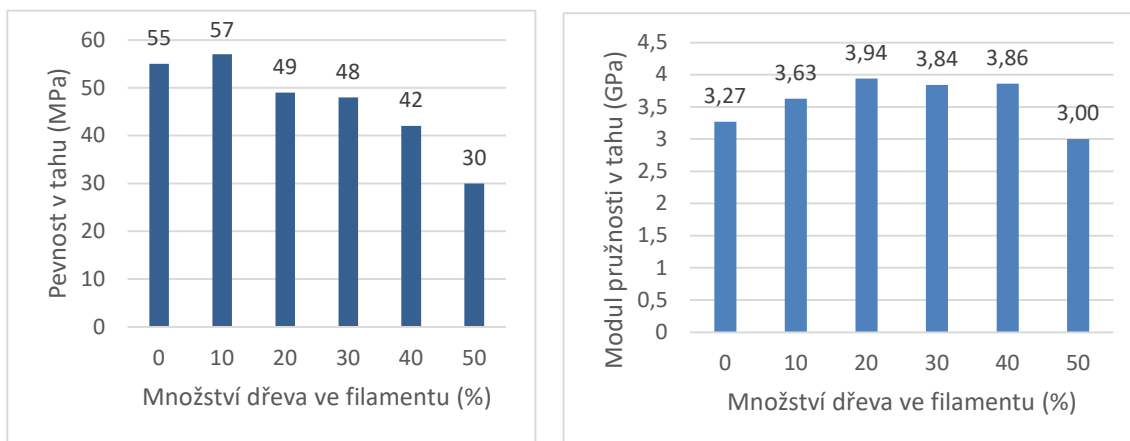
a hustota bukového dřeva, které bylo míseno s testovaným PLA je přibližně $0,65 \text{ g/cm}^3$. Hustota filamentu PLA s příměsí dřeva je srovnatelná s běžnými filamenti, které mají hustotu $1,24 \text{ g/cm}^3$ pro PLA a $1,06 \text{ g/cm}^3$ pro ABS [24].

Hustota vytištěných dílů s rostoucím podílem dřeva taktéž klesá. Důvodem je jak nižší hustota dřeva, tak celkový objem filamentu přítomný v testovaných vzorcích. Obsahuje-li filament větší množství dřeva, nevytéká z trysky rovnoměrně a vzorky poté neobsahují rovnoměrné množství materiálu. Vliv mají také mírné odchylky v průměru filamentu, které mají vliv na množství materiálu naneseného na tištěné vzorky.



Graf 2.1 Závislost hustoty filamentu a 3D tištěných dílů na množství dřeva v materiálu – podle [24].



















Pevnost v tahu filamentů se oproti PLA s 0 % dřeva, u kterého byla její hodnota 55 MPa, zvýšila na 57 MPa po přidání 10 % dřeva. Při dalším přidávání dřeva postupně klesala až na konečných 30 MPa u filamentu obsahujícího 50 % Dřeva (viz graf 2.2). Pro modul pružnosti je tendence odlišná. Filament bez přísady dřeva má modul pružnosti (E) 3,27 GPa. Tato hodnota se u filamentu s 20 % dřeva zvýšila na 3,94 GPa. Další přidávání dřeva vedlo k postupnému snižování modulu pružnosti, až na nejnižší hodnotu 3,00 GPa u materiálu s obsahem 50 % dřeva (viz graf 2.3) [24].



Grafy 2.2 a 2.3 Vlevo závislost pevnosti v tahu na množství dřeva ve filamentu, vpravo závislost modulu pružnosti na množství dřeva ve filamentu – podle [24].

Přidání nižšího obsahu dřeva tedy vede k mírnému zvýšení pevnosti v tahu a modulu pružnosti. Přidání většího množství dřeva tyto hodnoty naopak snižuje. S nízkým obsahem dřeva se částice chovají jako výztuž, ale při vyšším obsahu nemůže polymer částice úplně obalit, což vede k zhoršené přilnavosti a omezenému přenosu zátěže mezi základním materiálem a příměsí [24].

Povrch vytištěný z PLA bez přísad je hladký a bez dutin. S rostoucím podílem dřeva se povrch stává drsnějším, pórovitějším a lze na něm vidět shluky dřevěných částic. Tmavé místa na hranách dílů tištěných z materiálu s 30 % až 50 % dřevěných částic (viz obr. 2.1) jsou dutiny, kde nebyl nanesen materiál z důvodu nerovnoměrného výtoku filamentu z trysky. Nerovnoměrný povrch má také vliv na mechanické vlastnosti kvůli špatně vázaných dřevěných částic, které neefektivně přenášejí zátěž [24].

Množství dřeva ve filamentu	Vytištěný díl		
	Filament (70x)	Povrch (20x)	Hrana (40x)
0 %			
10 %			
20 %			
30 %			
40 %			
50 %			

Obr. 2.1 Vzhled filamentu (vlevo), povrchu (uprostřed) a hrany (vpravo) vytištěného dílu – podle [24].

2.3 Vliv charakteristik dřevěných přísad na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

Na mechanické vlastnosti tištěných dílů má kromě množství přidaného dřeva vliv také tvar dřevěných částic a druh dřeva, ze kterého jsou částice skládány. Typicky je do termoplastů dřevo přidáváno v podobě pilin nebo vláken. Pro piliny jsou směrodatnými vlastnostmi jejich velikost a množství, zatímco pro vlákna je to jejich orientace a délka. Přísadou do termoplastů mohou být jak měkké, tak tvrdé dřeviny. Mezi měkké dřevo se řadí například smrk, jedle, modřín nebo borovice. Mezi tvrdé patří mimo jiné javor, osika, bříza, dub a buk. [36,37,38,39].

Hustota tištěných dílů není přímo závislá na hustotě použitého druhu dřeva. Hlavní vliv má na hustotu morfologie dřevěných částic, přičemž kulatější částice s hladším povrchem produkují hustější materiál. Na velikosti částic hustota nezávisí [40].

Na pevnost v tahu a tuhost kompozitních materiálů s příměsí dřeva v podobě pilin má zásadní vliv množství pilin, zatímco jejich velikost na pevnosti a tuhosti velkou roli nehraje. Velikost pilin má vliv zejména na houževnatost materiálu. Čím větší jsou piliny, tím větší množství energie materiál při vzniku lomu absorbuje. Při přidání dřeva v podobě vláken dosahuje materiál ve srovnání s pilinami vyšší pevnosti v tahu díky lepšímu přenosu napětí ze základního materiálu na vlákna. Na mechanické vlastnosti má vliv i délka vláken. S rostoucí délkou vláken roste také modul pružnosti a schopnost materiálu absorbovat vodu. Houževnatost je při použití pilin i vláken téměř totožná [36,39].

Druh dřeva nemá na pevnost v tahu zásadní vliv, stejně tak jako na deformaci na mezi pevnosti a modul pružnosti. Měkké dřeviny zvyšují houževnatost materiálu jak ve tvaru pilin, tak ve tvaru vláken. Tvrdé dřeviny mají podobný účinek. K dalšímu navýšení těchto hodnot lze použít spojovací prostředky ke zvýšení přilnavosti částic dřeva k základnímu materiálu. [38,40]

2.4 Volba filamentu pro testování

Pro testování byl zvolen woodFill společnosti colorFabb. Materiál obsahuje 70 hm. % PLA a 30 hm. % recyklovaných dřevěných vláken z borovice. Průměr struny je 1,75 mm, tolerance průměru filamentu je $\pm 0,05$ mm. Struna je oproti běžnému PLA mnohem křehčí a při zavádění do tiskárny se snadno zlomí, je proto důležité dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci. Výrobce uváděné materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2.1 [25].

Tab. 2.1 Výrobce uváděné vlastnosti materiálu woodFill – podle [25].

Materiálové vlastnosti	Jednotka	Hodnota	Metoda
Hustota	g/cm ³	1,15	ISO 1183
Modul pružnosti v tahu	MPa	3290	ISO 527
Pevnost v tahu	MPa	46	ISO 527
Deformace na mezi pevnosti	%	4,8	ISO 527
Napětí při porušení	MPa	42	ISO 527
Deformace při porušení	%	5,5	ISO 527
Teplota tání	°C	>155	ISO 3146-C
Vrubová houževnatost (Charpy)	kJ/m ²	4,2	ISO 179-1/1 eA

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bude pozorován vliv vybraných tiskových parametrů na vytípané vlastnosti dílu. Jednou z testovaných vlastností je pevnost v tahu filamentu woodFill a PLA stejného výrobce pro srovnání. Poslední podkapitola experimentální části se bude zabývat možnostmi povrchových úprav dílů, jako je broušení a nanášení olejů na dřevo.

Tiskárna použitá pro tisk vzorků je Creality Ender 3 V2. Jedná se o levnou tiskárnu určenou převážně pro domácí užití. Vzorky byly modelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2020 a G-code byl generován v programu Ultimaker Cura, verze 4.8.

3.1 Vliv vybraných tiskových parametrů na vytípané vlastnosti dílu

Proměnnými parametry v této kapitole budou teplota a rychlost tisku. Tyto parametry tisku mají největší podíl na vzhledu a mechanických vlastnostech tištěného dílu.

Teplota tisku má vliv na několik vlastností finálního dílu. Nižší teploty typicky vedou k lepší vizuální kvalitě tisku. Pokud je ovšem teplota tisku příliš nízká, dojde k nesoudržnosti jednotlivých vrstev, což vede ke špatným mechanickým vlastnostem dílu. Naopak je-li teplota příliš vysoká, materiál příliš dlouho chladne a dochází ke ztrátě detailu na dílu [28].

Rychlost tisku má vliv především na vizuální stránku dílu. Při použití vysokých rychlostí tisku dochází ke zviditelnění jednotlivých vrstev filamentu. Příliš vysoké rychlosti mohou mít také negativní dopad na rozměrovou přesnost dílu a v extrémních případech může tryska narazit do dílu a tím jej odlepit od podložky, což vede k neúspěšnému tisku.

Pozorovanými vlastnostmi jsou rozměrová přesnost, kvalita povrchu ve všech osách, stringování, barva a pevnost v tahu. U všech testů byly tištěny vzorky v rozmezí teplot 190–220 °C s krokem 5 °C. Jedná se o výrobcem doporučený rozsah teplot tisku. Průměr použité trysky je 0,4 mm. Parametry tisku, které zůstaly u všech vzorků neměnné jsou uvedeny v tabulce 3.1.

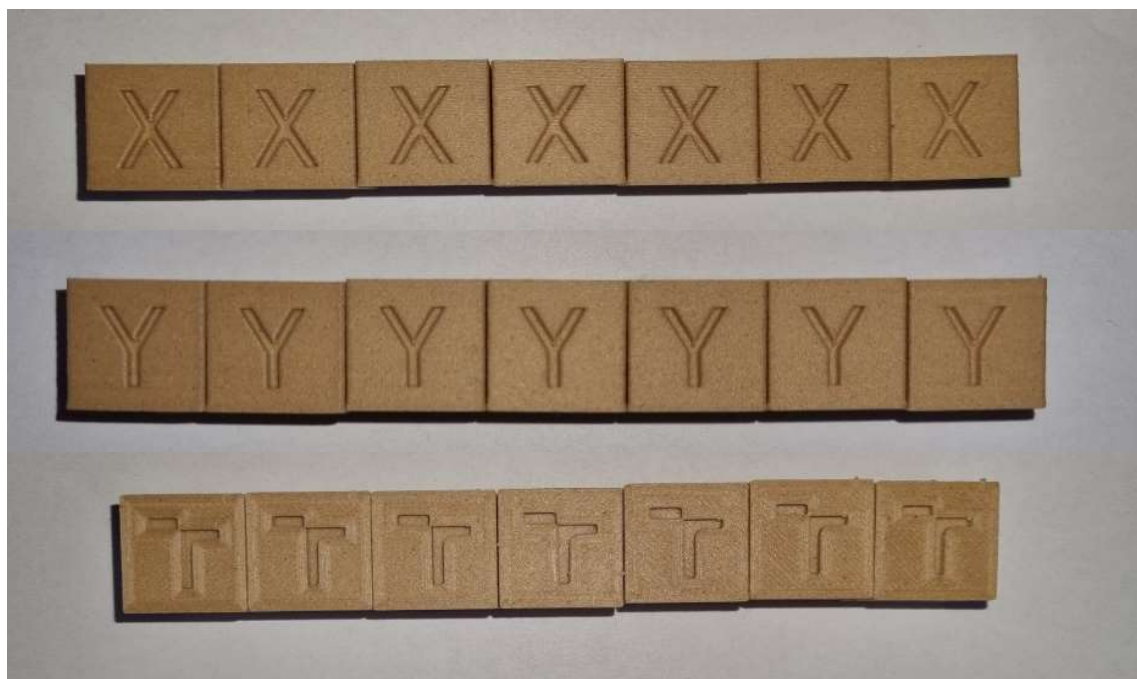
Tab. 3.1 Parametry tisku stejné pro všechny vzorky.

Neměnné parametry	Jednotka	Hodnota
Rychlost tisku	mm·s ⁻¹	40
Výška vrstvy	mm	0,2
Teplota podložky	°C	50
Hustota výplně	%	25
Retrakce	mm	5
Rychlost retrakce	mm·s ⁻¹	45

3.1.1 Vliv teploty tisku na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu

Vzorkem na tento test byla krychle o délce hrany 20 mm s označenými osami X, Y a Z. Místo písmene Z bylo k označení osy Z použito logo VUT (viz obr. 3.1).

Na dotek jsou strany krychle drsnější než při použití PLA. Vzhled jednotlivých krychlí se s teplotou na osách X a Y nijak neměnil, zatímco na ose Z s rostoucí teplotou degradoval. Došlo tvorbě rýh a viditelných stopy, které za sebou zanechala tryska v průběhu tisku. Rozměry jednotlivých vzorků při daných teplotách jsou zaznamenány v tabulkách 3.2 až 3.8.



Obr. 3.1 Ukázka vytištěných vzorků pro rozměrovou přesnost seřazených vzestupně podle teploty tisku, nahoře osa X, uprostřed osa Y, dole osa Z.

Tab. 3.2 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 190 °C.

Teplota tisku 190 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,04	20,02	20,05	20,04	20,03	20,02	20,033	0,033
Y	mm	20,00	19,98	20,01	20,02	20,00	20,01	20,003	0,003
Z	mm	19,90	19,92	19,91	19,89	19,94	19,90	19,910	-0,090

Tab. 3.3 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 195 °C.

Teplota tisku 195 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,05	20,04	20,05	20,04	20,06	20,04	20,047	0,047
Y	mm	20,04	20,02	20,02	20,03	20,04	20,03	20,030	0,030
Z	mm	19,89	19,91	19,91	19,88	19,90	19,90	19,898	-0,102

Tab. 3.4 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 200 °C.

Teplota tisku 200 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,11	20,09	20,13	20,11	20,10	20,12	20,110	0,110
Y	mm	20,06	20,04	20,07	20,05	20,06	20,06	20,057	0,057
Z	mm	19,91	19,92	19,91	19,88	19,90	19,91	19,905	-0,095

Tab. 3.5 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 205 °C.

Teplota tisku 205 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,14	20,13	20,17	20,12	20,15	20,14	20,141	0,141
Y	mm	20,14	20,14	20,15	20,11	20,14	20,12	20,133	0,133
Z	mm	19,94	19,92	19,88	19,91	19,92	19,93	19,917	-0,083

Tab. 3.6 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 210 °C.

Teplota tisku 210 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,14	20,16	20,16	20,17	20,17	20,15	20,158	0,158
Y	mm	20,11	20,14	20,15	20,14	20,14	20,13	20,135	0,135
Z	mm	19,88	19,91	19,92	19,90	19,91	19,89	19,902	-0,098

Tab. 3.7 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 215 °C.

Teplota tisku 215 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,17	20,17	20,18	20,16	20,18	20,17	20,172	0,172
Y	mm	20,15	20,16	20,16	20,15	20,15	20,16	20,155	0,155
Z	mm	19,88	19,93	19,91	19,89	19,92	19,91	19,907	-0,093

Tab. 3.8 Rozměrová přesnost při teplotě tisku 220 °C.

Teplota tisku 220 °C									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,20	20,21	20,18	20,20	20,19	20,18	20,193	0,193
Y	mm	20,15	20,14	20,17	20,16	20,16	20,16	20,157	0,157
Z	mm	19,91	19,92	19,90	19,89	19,92	19,90	19,907	-0,093

Výpočet aritmetického průměru

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Kde: \bar{x} [mm] – Aritmetický průměr
 x_i [mm] – Hodnota měření
 n – Počet hodnot

Výpočet odchylky

$$\sigma = \bar{x} - a_{nom} \text{ [mm]} \quad (2)$$

Kde: σ [mm] – Odchylka
 \bar{x} [mm] – Aritmetický průměr
 a_{nom} [mm] – Nominální délka hrany

Vzorový výpočet odchylky od požadovaného rozměru krychle na základě hodnot v prvním řádku Tab. 3.2.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{20,04 + 20,02 + 20,05 + 20,04 + 20,03 + 20,02}{6} = 20,033 \text{ mm}$$

$$\sigma = \bar{x} - a_{nom}$$

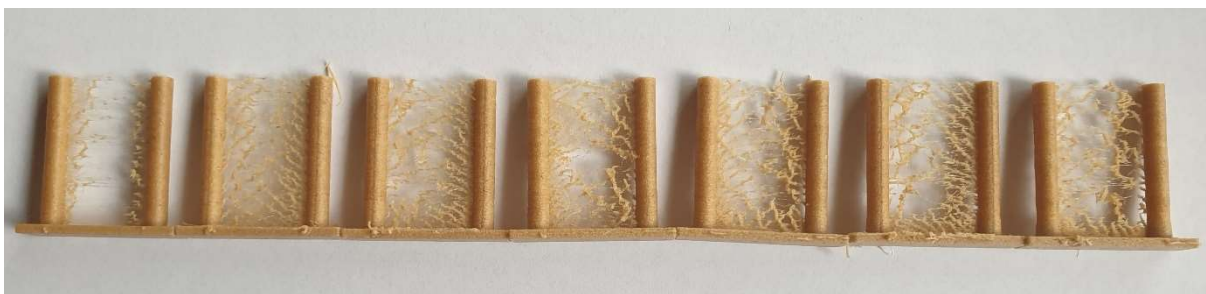
$$\sigma = 20,033 - 20 = 0,033 \text{ mm}$$

Zvyšováním teplot došlo k nárůstu odchylky od původních 20 mm. Vysvětlením je tepelná roztažnost materiálu. Rozdíl mezi jednotlivými teplotami nehrál roli v ose Z, a to proto, že je první vrstva tištěna vždy přimáčknuta k podložce silněji než vrstvy navazující, aby nedošlo k odlepení modelu od podložky v průběhu tisku. Výraznější odchylky v ose X ve srovnání s osou Y pravděpodobně způsobil nedostatečně utažený řemen ovládající pohyb tiskové hlavy. K nepřesnostem přispíval také nestálý průměr filamentu, který má z výroby odchylky ± 5 mm (viz tab. 3-9).

3.1.2 Vliv teploty tisku na stringování

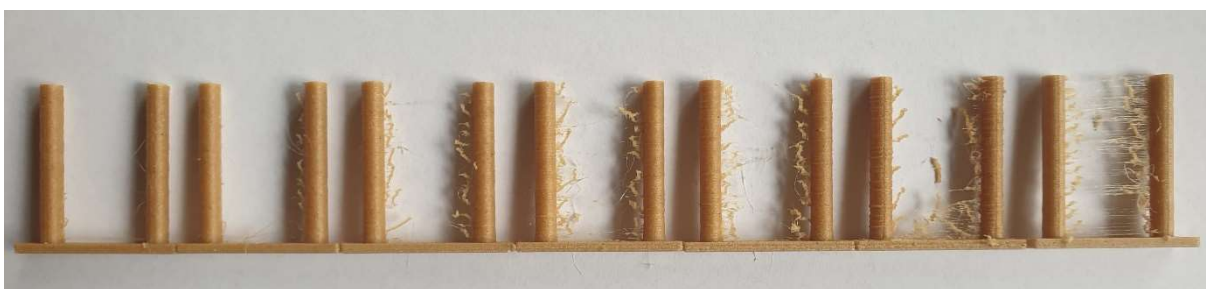
Stringování je tvorba vlásečnic v průběhu tisku. Dochází k němu vytékáním malého množství plastu z trysky při jejím pohybu do nové pozice. Modelem pro tento test jsou dva válce vzdálené 20 mm od sebe. Teorie za tímto testem je, že tryska musí mezi válci neustále cestovat, jelikož jsou oba tištěny současně a přebytečný materiál z ní mezitím odkapává do prostoru mezi nimi [26].

Při standartním nastavení tisku, kdy ostatní PLA materiály tisknou bez komplikací, byla kvalita modelu určeného pro tento test nepřijatelná pro všechny testované teploty (viz obr. 3.2). Pro tisk tohoto materiálu je tedy nutné zvýšit rychlost i délku retrakcí.



Obr. 3.2 Stringování před úpravou retrakce.

Po zvýšení délky a rychlosti retrakce na 10 mm a 50 mm·s⁻¹ respektive, což jsou maximální doporučené hodnoty ve slicovacím programu Cura, došlo ke zlepšení na všech teplotách. Výsledky ale ani přesto nejsou srovnatelné s běžným PLA a na všech teplotách nad 190 °C bude potřeba produkty od vlasečnic čistit (viz obr. 3.3). Jemné vlasečnice lze jednoduše odstranit horkovzdušnou pistolí, silnější je nutné od modelu odstříhnout.



Obr. 3.3 Stringování po úpravě retrakce.

3.1.3 Vliv teploty tisku na přemostování

Při přemostování není materiál tištěn na předcházející vrstvu, ale do vzduchu a u delších vzdáleností dochází k jeho prověšení. Při nižších teplotách tisku je materiál tužší, tudíž drží lépe tvar. Pokud produkt vyžaduje delší přemostování, je nutné využít podpěr. Testovacím modelem jsou kvádry vzdálené 5, 10 a 20 mm a spojené mostem o tloušťce 2 mm. Sledovaným jevem je míra prověšení nejnižší vrstvy mostu. K určení míry prověšení byla měřena skutečná tloušťka mostu v jeho středu. Naměřené prověšení jsou zaznamenány v tabulce 3.9.

Tab. 3.9 Vliv teploty tisku na výšku mostu.

Délka mostu	Jednotka	Teplota tisku						
		190	195	200	205	210	215	220
[-]	°C	Výška mostu						
		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
5	mm	2,05	2,10	2,20	2,20	2,20	2,25	2,30
10	mm	2,20	2,20	2,30	2,30	2,30	2,30	2,35
20	mm	2,55	2,65	2,75	2,75	2,75	2,85	2,80

Pro mosty o délce 5 a 10 mm není třeba použít podpěr pro teplotu tisku do 195 °C, protože materiál stíhá ztuhnout a nedochází k výraznému prověšení. Pro vyšší teploty jsou podpěry doporučeny. U mostu délky 20 mm je nutné použít podpěry

u všech teplot, jelikož jsou odchylky výšky mostu od nominálních dvou milimetrů vysoké.

U mostu tištěného při teplotě 220 °C lze vidět separaci spodní vrstvy mostu od navazujících vrstev, použití podpěr je tudíž v tomto případě nezbytné (viz obr. 3.4).



Obr. 3.4 Most o délce 20 mm tištěný při teplotě 220 °C.

3.1.4 Vliv teploty tisku na barvu dílu

Modelem zvoleným pro tuto část je 3D Benchy (model dostupný z [45]) vytvořený společností Creative Tools. Model byl zvolen pro jeho komplexní geometrii, na které lze jednoduše sledovat vliv teploty na barvu různých částí modelu.



Obr. 3.5 Model vytištěný při teplotě 190 °C, model dostupný z [45].



Obr. 3.6 Model vytištěný při teplotě 220 °C, model dostupný z [45].

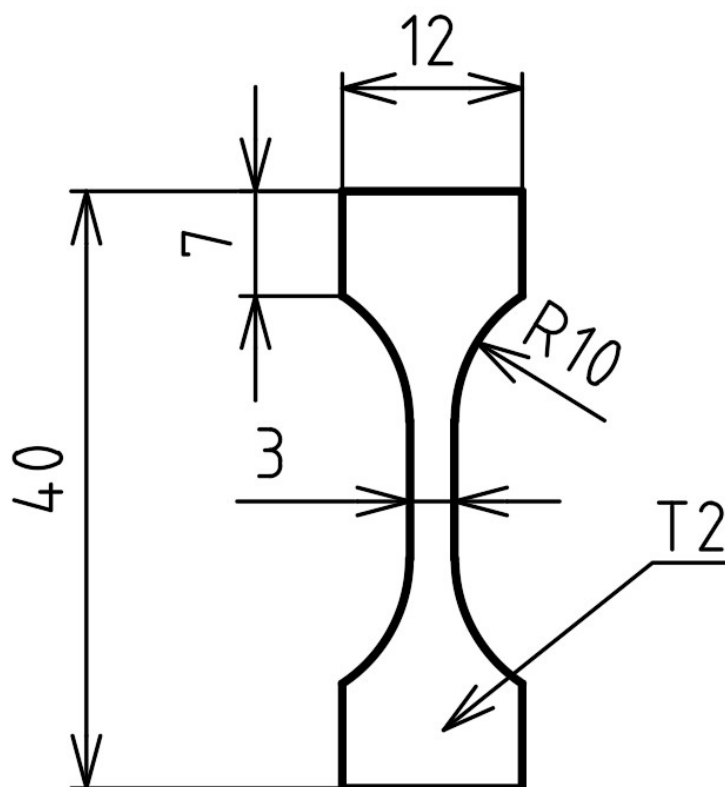
Modely vytištěné při nižších teplotách mají po celém povrchu stejnou barvu a jednotlivé vrstvy filamentu jsou málo viditelné. U vyšších teplot je barva v různých částech modelu odlišná a vrstvy jsou výraznější, v kombinaci tyto vlastnosti budí dojem produktu, který přirozeněji napodobuje skutečné dřevo. Nejlépe lze rozdíl mezi modely sledovat na těle lodi a na střeše kabiny (viz obr. 3.5 a 3.6).

3.1.5 Vliv teploty tisku na pevnost v tahu, srovnání s PLA/PHA

Při tahové zkoušce je vzorek umístěn do čelistí trhacího zařízení a následně zatěžován rostoucí silou. Při dosažení meze pevnosti materiálu, kdy je vzorek přetržen, je zaznamenána maximální síla v Newtonech, která je poté přepočtena na Megapascaly v závislosti na skutečné rozměry testovaného vzorku.

Pro experiment bylo vytištěno osm vzorků v každé testované teplotě, které byly následně umístěny do trhacího zařízení. Hodnoty síly potřebné k přetržení vzorků jsou zaznamenány v tabulkách 3.10 a 3.11. Tyto hodnoty byly poté pomocí skutečných rozměrů jednotlivých vzorků přepočteny na pevnost v tahu v megapascalech. V posledních dvou sloupcích tabulek jsou zaznamenány průměry a mediány mezi pevnosti jednotlivých materiálů při daných teplotách tisku. Vzorky na tento test byly tištěny se 100 % výplně.

Materiál byl srovnáván s PLA/PHA (kyselina polymléčná / polyhydroxyalkanát) filamentem červené barvy firmy colorFabb. Tento materiál byl na porovnání zvolen, protože tvoří základní strukturu filamentu woodFill, je tudíž vhodný pro zjištění, jaký vliv má přísada dřeva na mez pevnosti. Vzorek pro experiment je vyobrazen na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Popis vzorků.

Tab. 3.10 Vliv teploty tisku na pevnost v tahu materiálu s příměsí dřeva.

Teplota	Číslo vzorku	Šířka vzorku	Výška vzorku	pevnost v tahu	pevnost v tahu	\bar{x}	\bar{x}
[°C]	[-]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
190	1	2,97	1,86	182,7	33,073	34,875	35,375
	2	2,94	1,81	191,4	35,968		
	3	2,95	1,83	192,6	35,677		
	4	2,92	1,82	196,6	36,994		
	5	2,89	1,83	175,4	33,165		
	6	2,99	1,83	182,6	33,372		
	7	2,99	1,85	194,0	35,072		
	8	2,95	1,81	190,5	35,677		
195	1	2,95	1,82	176,0	32,781	35,942	36,440
	2	3,03	1,82	193,4	35,071		
	3	2,96	1,82	195,0	36,197		
	4	2,93	1,82	195,0	36,568		
	5	2,95	1,77	189,6	36,311		
	6	2,90	1,82	195,8	37,097		
	7	2,96	1,82	198,6	36,865		
	8	2,90	1,82	193,4	36,643		

Teploata	Číslo vzorku	Šířka Vzorku	Výška Vzorku	Pevnost v tahu	Pevnost v tahu	\bar{x}	\bar{x}
[°C]	[-]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
200	1	3,01	1,81	183,7	33,718	33,947	35,358
	2	2,96	1,80	185,5	34,816		
	3	2,87	1,89	190,0	35,028		
	4	2,95	1,85	187,5	34,356		
	5	2,95	1,84	186,5	34,359		
	6	2,96	1,91	190,0	33,607		
	7	3,01	1,87	175,9	31,251		
	8	2,95	1,82	184,9	34,438		
205	1	3,06	1,81	189,0	34,124	33,914	34,168
	2	3,05	1,82	194,5	35,039		
	3	3,01	1,79	190,3	35,320		
	4	3,02	1,82	192,3	34,987		
	5	2,99	1,81	166,0	30,673		
	6	3,05	1,82	186,1	33,525		
	7	3,05	1,84	192,0	34,212		
	8	2,96	1,81	179,1	33,429		
210	1	3,02	1,82	180,3	32,803	32,726	33,114
	2	3,02	1,86	186,2	33,148		
	3	2,98	1,87	185,8	33,342		
	4	3,03	1,82	184,1	33,384		
	5	3,00	1,80	179,6	33,259		
	6	2,98	1,83	180,4	33,080		
	7	2,97	1,87	178,6	32,158		
	8	3,00	1,83	168,2	30,638		
215	1	2,99	1,86	179,3	32,240	34,094	31,980
	2	2,95	1,83	223,7	41,437		
	3	3,02	1,82	173,5	31,566		
	4	3,01	1,86	221,7	39,599		
	5	3,06	1,85	194,5	34,358		
	6	2,99	1,88	178,3	31,719		
	7	2,99	1,84	169,8	30,864		
	8	3,04	1,83	172,3	30,971		
220	1	2,98	1,86	170,5	30,761	37,117	32,805
	2	3,05	1,86	195,6	34,479		
	3	3,00	1,88	219,4	38,901		
	4	2,97	1,85	166,3	30,267		
	5	3,04	1,82	170,2	30,762		
	6	3,06	1,85	299,8	52,959		
	7	2,94	1,84	257,9	47,675		
	8	2,98	1,84	170,7	31,131		

Výpočet plochy vzorku

$$S = a \cdot b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

Kde: S [mm²] – Skutečná plocha vzorku
 a [mm] – Šířka vzorku
 b [mm] – Výška vzorku

Výpočet pro zatížení tahem

$$\tau = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Kde: τ [MPa] – Pevnost v tahu
 F [N] – Silové zatížení
 S [mm²] – Skutečná plocha vzorku

Výpočet mediánu

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Kde: \tilde{x} [MPa] – Medián
 $x_{n/2}$ [MPa] – Prostřední naměřená hodnota zdola
 $x_{(n/2)+1}$ [MPa] – Prostřední naměřená hodnota shora

Vzorový výpočet zatížení tahem na základě hodnot v prvním řádku Tab. 3.10.

$$S = a \cdot b$$

$$S = 2,97 \cdot 1,86 = 5,5242 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\tau = \frac{182,7}{5,5242} = 33,073 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet aritmetického průměru podle rovnice (1) pro teplotu 190 °C v Tab. 3.10.

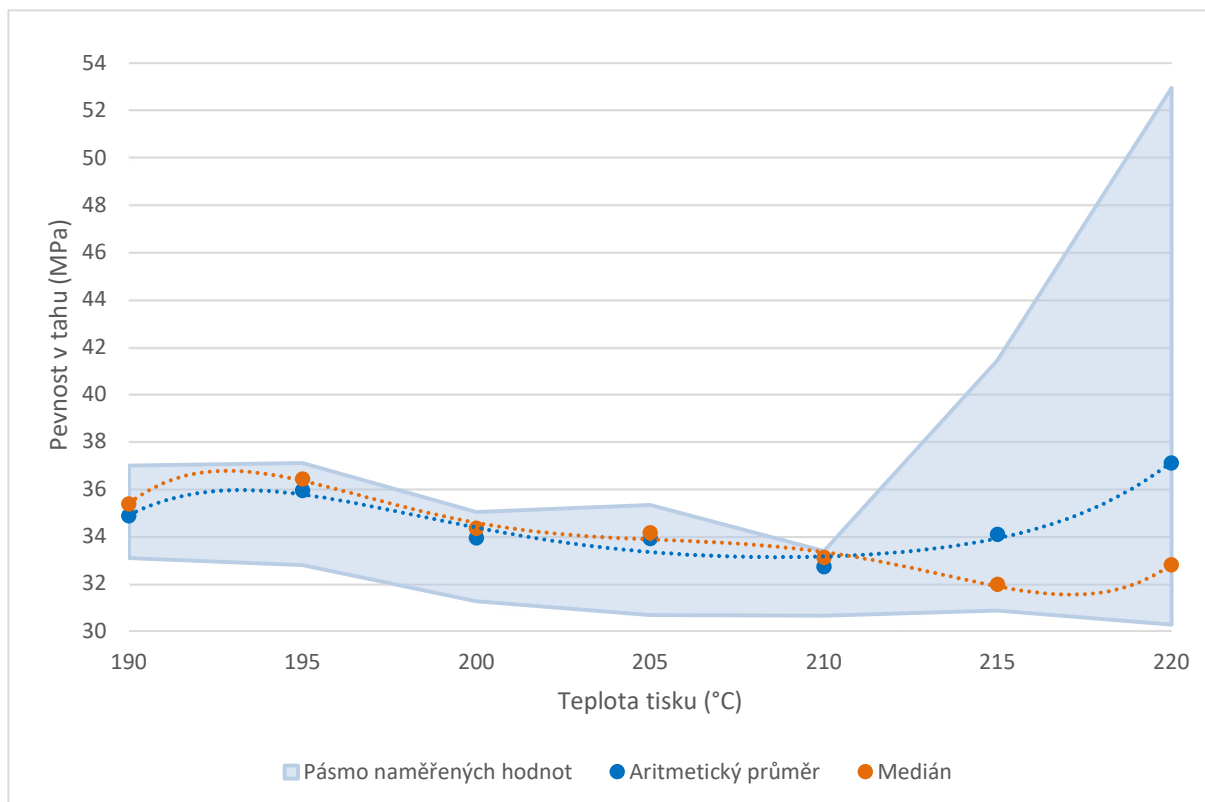
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{33,073 + 35,968 + 35,677 + 36,994 + 33,165 + 33,372 + 35,072 + 35,677}{8} = 34,875 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet mediánu pro teplotu 190 °C v Tab. 3.10.

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2}$$

$$\bar{x} = \frac{35,072 + 35,677}{2} = 35,375 \text{ MPa}$$



Graf 3.1 Závislost meze pevnosti v tahu materiálu woodFill na teplotě tisku.

Tab. 3.11 Vliv teploty tisku na pevnost v tahu materiálu PLA/PHA.

Teplota	Číslo vzorku	Šířka Vzorku	Výška Vzorku	Pevnost v tahu	Pevnost v tahu	\bar{x}	\bar{x}
[°C]	[-]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
190	1	3,03	1,95	338,3	57,256	55,787	55,958
	2	3,02	1,94	333,8	56,974		
	3	2,99	1,94	328,6	56,649		
	4	3,00	1,91	316,9	55,305		
	5	2,99	1,94	319,3	55,046		
	6	2,99	1,98	332,9	56,231		
	7	3,04	1,94	328,4	55,684		
	8	2,95	2,06	323,0	53,151		
195	1	2,96	1,92	313,3	55,127	54,240	54,360
	2	3,03	1,93	317,2	54,242		
	3	2,99	2,01	325,3	54,127		
	4	2,97	1,96	321,7	55,264		
	5	3,00	1,98	311,7	52,475		
	6	3,01	2,02	326,2	53,650		
	7	3,00	1,98	323,6	54,478		
	8	3,04	1,95	323,4	54,555		

Teplota	číslo vzorku	Šířka Vzorku	Výška Vzorku	pevnost v tahu	pevnost v tahu	\bar{x}	\bar{x}
[°C]	[-]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
200	1	2,99	2,01	314,3	52,297	53,652	53,525
	2	2,98	1,94	308,1	53,293		
	3	3,03	1,97	321,5	53,861		
	4	3,00	1,98	326,3	54,933		
	5	2,98	2,03	322,3	53,278		
	6	2,99	1,99	326,3	54,839		
	7	3,00	1,96	311,4	52,959		
	8	3,00	1,97	317,7	53,756		
205	1	3,02	2,00	328,8	54,437	55,669	54,462
	2	3,03	1,96	322,4	54,287		
	3	2,98	2,00	320,9	53,842		
	4	3,01	2,00	323,4	53,721		
	5	2,97	1,97	318,8	54,487		
	6	3,00	1,97	337,1	57,039		
	7	2,98	1,97	347,3	59,159		
	8	2,98	1,94	337,5	58,379		
210	1	2,98	1,94	334,9	57,929	57,275	57,518
	2	2,90	1,97	328,6	57,518		
	3	3,02	1,95	342,9	58,227		
	4	3,02	1,95	337,9	57,378		
	5	2,99	1,91	315,0	55,158		
	6	3,03	1,94	333,5	56,735		
	7	2,90	1,99	334,6	57,980		
	8	zmetek					
215	1	2,98	2,01	326,0	54,426	54,637	54,761
	2	2,97	1,97	307,5	52,556		
	3	3,01	1,97	330,4	55,720		
	4	3,03	1,93	318,5	54,464		
	5	2,90	1,93	310,0	55,387		
	6	3,01	1,91	314,5	54,704		
	7	3,00	1,95	321,9	55,026		
	8	3,01	1,96	323,4	54,817		
220	1	3,00	1,96	322,9	54,915	57,080	57,042
	2	3,01	1,96	340,3	57,682		
	3	3,01	1,95	345,5	58,864		
	4	3,00	1,94	326,7	56,134		
	5	3,00	1,96	333,3	56,684		
	6	2,99	1,91	327,6	57,364		
	7	2,97	1,98	342,7	58,276		
	8	3,00	1,92	326,7	56,719		

Vzorový výpočet zatížení tahem podle rovnice (3) na základě hodnot v prvním řádku Tab. 3.11.

$$S = a \cdot b$$

$$S = 3,03 \cdot 1,95 = 5,9085 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\tau = \frac{338,3}{5,9085} = 57,256 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet aritmetického průměru podle rovnice (1) pro teplotu 190 °C Tab. 3.11.

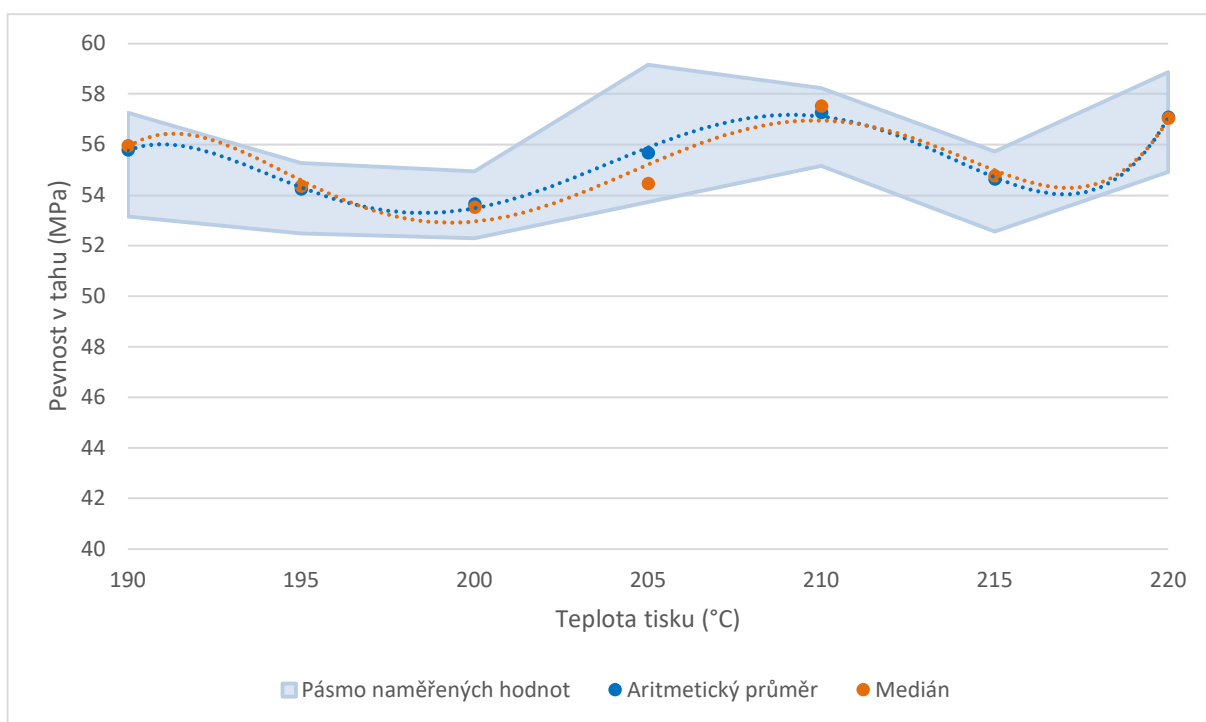
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{57,256 + 56,974 + 56,649 + 55,305 + 55,046 + 56,231 + 55,684 + 53,151}{8} = 55,787 \text{ MPa}$$

Vzorový výpočet mediánu podle rovnice (5) pro teplotu 190 °C v Tab. 3.11.

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2}$$

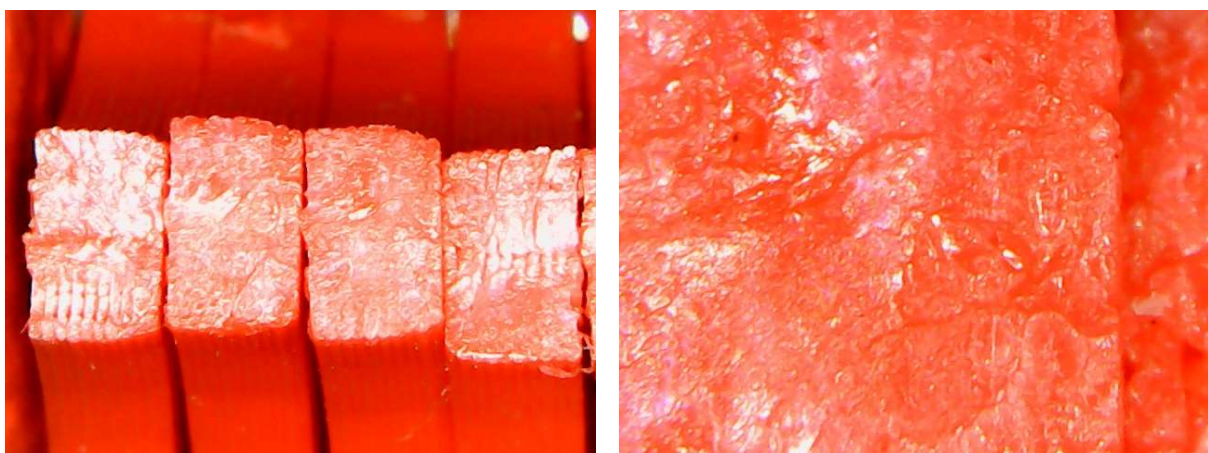
$$\tilde{x} = \frac{55,684 + 56,231}{2} = 55,958 \text{ MPa}$$



Graf 3.2 Závislost meze pevnosti v tahu materiálu PLA/PHA na teplotě tisku.



Obr. 3.8 a 3.9 Fotografie přetržených vzorků z materiálu woodFill, vlevo zvětšeno 50×, vpravo zvětšeno 100×.



Obr. 3.10 a 3.11 Fotografie přetržených vzorků z materiálu PLA/PHA, vlevo zvětšeno 50×, vpravo zvětšeno 100×

Při teplotách 215 °C a 220 °C se výrazně rozšiřuje rozptyl naměřených hodnot pevností materiálu woodFill (viz graf 3.1). Rozptylem naměřených hodnot je také zapříčiněn rozdíl mezi aritmetickým průměrem a mediánem v těchto teplotách. Rozptyl naměřených hodnot materiálu PLA/PHA zůstává při všech teplotách konstantní (viz graf 3.2).

Významný vliv na rozdíl pevnosti mezi woodFillem a PLA/PHA mají dutiny přítomné ve vzorcích vytištěných z materiálu woodFill (viz obr. 3.8 a 3.9), zatímco vzorky z PLA/PHA žádné dutiny neobsahují (viz obr. 3.10 a 3.11). Pórovitost je typickou vlastností materiálů s příměsí dřeva a množství pórů se zvyšuje s rostoucím množstvím dřevěných částic přidávaných do základního materiálu [24].

3.1.6 Vliv rychlosti tisku na rozměrovou přesnost

Cílem této podkapitoly je minimalizace času tisku při zachování co nejvyšší kvality. Rychlosti, při kterých byly provedeny následující testy byly 30, 40, 50 a 60

mm·s⁻¹. Vyšší rychlosti nebyly použity, jelikož jich použitá tiskárna není schopná dosáhnout.

Pro minimalizaci vlivu teploty tisku byla zvolena teplota 190 °C, při které měly v kapitole 3.1.1 modely nejlepší rozměrovou přesnost. Ostatní neměnné parametry jsou vypsány v tabulce 3.12.

Tab. 3.12 Parametry tisku stejné pro všechny vzorky.

Neměnné parametry	Jednotka	Hodnota
Teplota tisku	°C	190
Výška vrstvy	mm	0,2
Teplota podložky	°C	50
Hustota výplně	%	25
Retrakce	mm	10
Rychlost retrakce	mm·s ⁻¹	50

Modely použité pro tento experiment jsou totožné jako v kapitole 3.1.1, tedy kostky o délce hrany 20 mm s označenými osami. Pro každou z výše uvedených rychlostí tisku bylo vytištěno 6 vzorků. V tabulkách 3.13 až 3.16 jsou zaznamenány naměřené rozměry vzorků a doba tisku jednoho vzorku při dané rychlosti.

Tab. 3.13 Rozměrová přesnost pro rychlost tisku 30 mm·s⁻¹.

Rychlost tisku 30 mm.s ⁻¹ , doba tisku 55 min									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,03	20,01	20,02	20,03	20,01	20,02	20,020	0,020
Y	mm	20,00	19,99	20,00	20,02	20,01	20,00	20,003	0,003
Z	mm	19.91	19.90	19.93	19.90	19.93	19.92	19.915	-0.085

Tab. 3.14 Rozměrová přesnost pro rychlost tisku 40 mm·s⁻¹.

Rychlost tisku 40 mm.s ⁻¹ , doba tisku 48 min									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,01	20,00	20,03	20,02	20,02	20,03	20,018	0,018
Y	mm	20,04	20,03	20,01	20,00	20,02	20,01	20,018	0,018
Z	mm	19.90	19.91	19.92	19.89	19.91	19.93	19.910	-0.090

Tab. 3.15 Rozměrová přesnost pro rychlost tisku 50 mm·s⁻¹.

Rychlost tisku 50 mm.s ⁻¹ , doba tisku 41 min									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose							
X	mm	20,03	20,01	20,01	20,02	20,03	20,03	20,022	0,022
Y	mm	20,02	20,00	20,02	20,01	20,03	20,01	20,015	0,015
Z	mm	19,89	19,88	19,91	19,92	19,94	19,91	19,908	-0,092

Tab. 3.16 Rozměrová přesnost pro rychlost tisku 60 mm·s⁻¹.

Rychlost tisku 60 mm·s ⁻¹ , doba tisku 39 min									
Osa	Jednotka	Číslo vzorku						Průměrný rozměr	Odchylka
[-]	[-]	1	2	3	4	5	6		
[-]	[-]	Rozměr na ose						Průměrný rozměr	Odchylka
X	mm	20,04	20,02	20,03	20,01	20,04	20,00		
Y	mm	20,01	20,03	20,02	20,01	20,03	20,02	20,020	0,020
Z	mm	19,94	19,92	19,88	19,89	19,91	19,93	19,911	-0,089

Vzorový výpočet odchylky od požadovaného rozměru krychle podle rovnic (1) a (2) na základě hodnot v prvním řádku Tab. 3.13.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{20,03 + 20,01 + 20,02 + 20,03 + 20,01 + 20,02}{6} = 20,020 \text{ mm}$$

$$\sigma = \bar{x} - a_{nom}$$

$$\sigma = 20,020 - 20 = 0,020 \text{ mm}$$

Rozdíly v odchylkách od nominálního rozměru jsou mezi jednotlivými rychlostmi zanedbatelné. Při tisku materiálů s příměsí dřeva tedy není nutné upravovat rychlost tisku od běžného PLA. Další pokusy zaměřené na vliv rychlosti tisku nebudou prováděny, jelikož na ostatní z pozorovaných charakteristik materiálu nemá rychlost tisku vliv. Vzhledově jsou jednotlivé vzorky nerozeznatelné.

3.2 Povrchové úpravy

Tato kapitola se zabývá možnostmi zlepšení kvality povrchu a vzhledu výrobků. Mezi možné úpravy povrchu plastů patří broušení, lakování a vyhlazování acetonem. Dřevo lze například brousit, lakovat či olejovat. Vzhledem k povaze testovaného materiálu bude testováno broušení a olejování.

3.2.1 Broušení

Modely byly broušeny ručně brusnými papíry o zrnitosti P400, P800 a P1200. Broušení probíhalo za mokra pro předejití vysokých teplot, které vznikají následkem tření papíru o výrobek. Při takových teplotách dochází k nenávratnému poškození povrchu výrobku způsobené nízkou teplotou tání materiálu.

Broušení brusným papírem o zrnitosti P400 vedlo k poškození modelu následkem vzniku rýh. Použití jemnějších brusných papírů vedlo k znatelně lepším výsledkům, povrch byl na dotek velmi jemný a nedošlo k jeho poškození. Materiál bylo možné brousit znatelně snáz než PLA bez přísad. Nevýhodou tohoto procesu je velká časová

náročnost, jelikož použité papíry mají relativně vysokou zrnitost. Pro srovnání dřeva se běžně brousí papíry o zrnitosti 180-220 [29].

3.2.2 Olejování

Dřevo bývá olejováno pro jeho ochranu před vlhkostí, vyniknutí detailů a pro snazší čištění. Před nanesením oleje je povrch broušen a poté očištěn.

K olejování byly použity tři druhy olejů na dřevo, a to HARDWAXOIL firmy CIRANOVA v tmavě šedé barvě, čirý Rustic Oil firmy JUNCKERS a tmavě hnědý Rustic Oil firmy JUNCKERS. Model použitý pro tuto kapitolu je totožný jako model použitý v kapitole 3.1.4, tedy kalibrovací loď. Lodě byly vnořeny do oleje, který se dvacet minut nechal vsakovat. Poté byl přebytečný olej setřen a modely se nechaly 24 hodin vyschnout.



Obr. 3.12 Díl po nanesení tmavě šedého oleje na dřevo firmy CIRANOVA.



Obr. 3.13 Díl po nanesení čirého oleje na dřevo firmy JUNCKERS.



Obr. 3.14 Díl po nanesení tmavě hnědého oleje firmy JUNCKERS.

3.3 Vyhodnocení experimentální části a technologicko-ekonomické zhodnocení

Proběhly testy na rozměrovou přesnost, kvalitu povrchu, stringování, přemostování, barvu, pevnost pro zatížení tahem a povrchové úpravy. Z dílčích závěrů podkapitol experimentální části vyplývá:

Pro tisk dílů s prioritou jejich vizuální stránku je ideální teplotou tisku 190 °C, při které bylo dosaženo nejlepší rozměrové přesnosti, nejmenšího stringování a nejmenšího prověšení při přemostování. Průměrné rozměrové odchylky od 2 mm při této teplotě činí 0,033 mm pro osu X, 0,003 mm pro osu Y a -0,090 mm pro osu Z. Minimální stringování eliminuje nutnost dalšího opracování dílů po vytištění. Je ovšem nutné správně nastavit rychlost a délku retrakcí, jelikož při nastavení tiskárny pro tisk běžného PLA se velké množství vlásečnic nacházelo na vzorcích tištěných při všech teplotách. Při tisku na této teplotě není třeba generovat podpěry pro přemostění o maximální délce 10 mm.

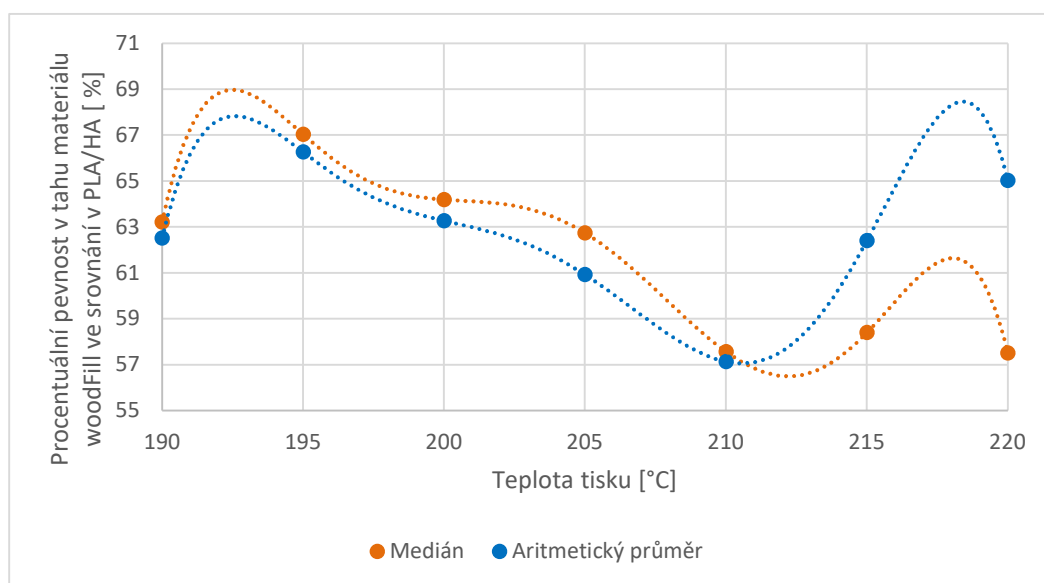
Na základě mediánu bylo nejvyšší pevnosti pro zatížení tahem dosaženo při teplotě tisku 195 °C, a to 36,440 MPa, nejnižší pevnost byla naměřena pro teplotu tisku 215 °C, a to 31,980 MPa. Pro srovnání materiál PLA/PHA dosáhl na základě mediánu nejvyšší pevnosti v tahu při teplotě tisku 210 °C, a to 57,518 MPa a nejnižší pevnosti při teplotě 200 °C, a to 53,525 MPa.

Na základě aritmetického průměru bylo nejvyšší pevnosti pro zatížení tahem dosaženo při teplotě tisku 220 °C, a to 37,117 MPa, nejnižší pevnost byla naměřena pro teplotu 210 °C, a to 32,726 °C. Materiál PLA/PHA dosáhl na základě aritmetického průměru nejvyšší pevnosti při teplotě tisku 210 °C, a to 57,275 MPa a nejnižší pevnosti při teplotě 200 °C, a to 53,652 MPa.

Z důvodu pórovitosti materiálů s příměsí dřeva dochází k širšímu rozptylu jednotlivých naměřených hodnot. Rozptyl je způsoben rozložením a velikostí těchto

duťin. Tyto výkyvy jsou zřejmě výraznější při vyšších tiskových teplotách, což je viditelné na rozdílu mediánu a aritmetického průměru hodnot naměřených při teplotě tisku 215 °C a 220 °C.

Nejmenšího rozdílu ve srovnání s materiálem PLA/PHA bylo pro medián dosaženo při teplotě tisku 195 °C, kdy hodnota pevnosti v tahu materiálu woodFill dosahovala 67,034 % pevnosti v tahu materiálu PLA/PHA. Největší rozdíl pro medián byl naměřen při teplotě 220 °C, kdy pevnost v tahu woodFillu dosahovala 57,511 % pevnosti PLA/PHA. Pro aritmetický průměr byl nejmenší rozdíl při teplotě 220 °C, kdy woodFill dosáhl 65,026 % materiálu PLA/PHA a největší rozdíl při teplotě 210 °C, kdy pevnost woodFillu dosáhla 57,139 % pevnosti PLA/PHA (viz graf 3.3).



Graf 3.3 Procentuální vyjádření pevnosti v tahu materiálu woodFill v porovnání s materiálem PLA/PHA

Rychlost tisku nehraje roli v rozměrové přesnosti dílů a na ostatní charakteristiky nemá vliv. Materiál je tedy možné tisknout při stejných rychlostech jako PLA.

Díly vyrobené z materiálů s příměsí dřeva lze snadno brousit. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím brusného papíru o zrnitosti P800 a broušením za mokra. Použitím této metody došlo ke znatelnému zjemnění povrchu, aniž by byl mechanicky poškozen. Na díly je možné také nanášet oleje na dřevo. Tento proces znatelně mění vzhled tištěných dílů a umožňuje jim imitovat širší škálu dřevin.

Mezi možné využití materiálu v praxi patří díly se složitou geometrií velmi náročně výrobitelné ze skutečného dřeva, různé dekorace či dětské hračky, jelikož PLA ani dřevo nejsou zdravotně závadné [30]. Díly z tohoto materiálu jsou z důvodu UV nestability a hygroskopických vlastností jak PLA, tak dřevěných částic nevhodné pro venkovní použití bez předchozího nanesení ochranné vrstvy, jako je například lak či olej. Z důvodu nízké meze pevnosti není materiál vhodný pro namáhané součástky. Výhodou materiálu je nižší hmotnost ve srovnání s ostatními materiály pro 3D tisk z důvodu nižší hustoty. Vysoká cena materiálu výrazně zužuje jeho využitelnost v malosériové výrobě, jelikož jednou z hlavních výhod 3D tisku je nízká nákladnost této technologie.

Materiály s příměsí dřeva jsou znatelně dražší než běžně používané materiály pro 3D tisk. Srovnání cen materiálů populárních výrobců nabízejících tyto materiály je uvedeno v tabulce 3.17.

Tab. 3.17 Srovnání cen PLA a PLA s příměsí dřeva vybraných výrobců [21,31,32,33,34,35].

Materiál	Cena za 1 Kg filamentu včetně DPH [Kč]
Print With Smile PLA Wood	1167
Print With Smile PLA	535
Fiberlogy Wood Filament	1313
Fiberlogy Easy PLA Filament	582
colorFabb woodFill	1666
colorFabb PLA/PHA	1241

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá kompozitními materiály s příměsí dřeva pro 3D FDM tisk. Všechny tyto komerčně dostupné materiály jsou vytvořeny přidáním dřevěných částic do PLA. V teoretické části byl zkoumán vliv různých charakteristik dřevěných částic na finální vlastnosti materiálů a byl vyvozen tento závěr.

- Při obsahu dřevěných částic 10 až 20 hm. % dojde k navýšení pevnosti v tahu a modulu pružnosti, přidání většího množství částic vede ke zhoršení těchto vlastností.
- Částice ve formě vláken dosahují vyšších mechanických vlastností než částice ve formě pilin.
- Druh přidaného dřeva je sekundární k tvaru částic ve vlivu na mechanické vlastnosti.

Na základě hodnot měření a výsledkům výpočtů pevnosti materiálů woodFill a PLA/PHA dosažených v experimentální části lze stanovit tento závěr.

- Nejvyšší mediánová pevnost pro zatížení tahem materiálu woodFill byla 36,440 MPa pro teplotu 195 °C a nejnižší mediánová pevnost pro zatížení tahem 31,980 MPa pro 215 °C.
- Nejvyšší průměrná pevnost pro zatížení tahem materiálu woodFill byla 37,117 MPa pro teplotu 220 °C a nejnižší průměrná pevnost pro zatížení tahem 21.726 MPa pro 210 °C.
- Při tisku obou materiálů při stejné teplotě se pevnost v tahu materiálu woodFill pohybuje v rozmezí 57 % až 67 % pevnosti v tahu materiálu PLA/PHA.
- Z experimentální části vyplývá, že ideální teplotou pro tisk materiálu woodFill je 190 °C až 195 °C. Zdůvodněním jsou nejlepší výsledky dosažené ve všech provedených experimentech.
- Povrchové úpravy materiálu jsou jednoduše proveditelné a mají pozitivní dopad na kvalitu vyrobeného dílu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges: A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, **143**, 172-196. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
2. STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
3. What is 3D printing. *3D PRINTING.com* [online]. Ashburn: Strikwerda en Dehue [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
4. *What are the benefits of 3D printing* [online]. Ashburn: 3Dnatives, 2018 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/why-3d-printing230720184/#!>
5. GAO, Wei, Yunbo ZHANG, Devarajan RAMANUJAN, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015, **69**, 65-89. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
6. How Today's High-Tech Hobbyists Use 3D Printing. *3DUNIVERSE* [online]. Chicago: 3DUNIVERSE, 2019, 13 March 2019 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://3duniverse.org/2019/03/13/how-todays-hobbyists-use-3d-printing/>
7. EMRE, Akbaş Oğuzhan, Hira ONUR, Hervan Sahar ZHIANI, Samankan SHAHRAD a Altınkaynak ATAKAN. Dimensional accuracy of FDM-printed polymer parts. *Rapid Prototyping Journal*. Emerald Publishing Limited, 2019, **26**(2), 288-298. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-04-2019-0115
8. MOETAZEDIAN, Amirpasha, Anthony Setiadi BUDISUHARTO, Vadim V. SILBERSCHMIDT a Andrew GLEADALL. CONVEX (CONTinuously Varied EXtrusion): A new scale of design for additive manufacturing: A new scale of design for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2021, **37**, 101576. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101576>
9. CHAKRAVORTY, Dibya. 3D Printing Support Structures - The Ultimate Guide. *All3DP* [online]. Chicago: All3DP, 2020 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>
10. *Prusament PLA* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/>
11. *PLA* [online]. Cincinnati: Simplify3D [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>
12. *Prusament PETG* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
13. *Rozdíl mezi ABS, PLA a PET-G* [online]. Praha [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>

14. *PETG Stringing: 3 Easy Ways to Prevent It* [online]. [cit. 2021-02-24].
Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
 15. *MAKERBOT REAL ABS | Data Sheet: Real, Production-Grade ABS for Manufacturing Applications* [online]. New York: MakerBot Industries, 2019 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://3qcbdntxdyb43ubh6h0b0qgz-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/09/MakerBot-Precision-ABS-1.pdf>
 16. *Everything you need to know about ABS 3D printing* [online]. New York: MakerBot Industries, 2019 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/abs-3d-printing/>
 17. *Ultimaker ABS* [online]. Montreal: Ultimaker BV, 2020 [cit. 2021-03-02].
Dostupné z: <https://ultimaker.com/materials/abs>
 18. *Prusament ASA* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2021-03-02].
Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
 19. *Flexible* [online]. Cincinnati: Simplify3D, 2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/flexible/#:~:text=Flexible%20filaments%20are%20made%20of,be%20stretched%20and%20flexed%20easily.>
 20. *All you need to know about TPU for 3D printing* [online]. Cincinnati: 3Dnatives, 2020 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/tpu-3d-printing-040620204/>
 21. *WOODFILL* [online]. Belfeld: colorFabb, 2018 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/woodfill>
 22. *Wood Filled* [online]. Cincinnati: Simplify3D, 2021 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/wood-filled/#:~:text=Overview,and%20other%20powdered%20wood%20derivatives.&text=This%20filament%20is%20also%20less,wood%20particles%20are%20much%20softer.>
 23. GREGURIĆ, Leo. Wood Filament: The Basics & Best Wood PLA Brands. *All3DP* [online]. All3DP, 2019 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/wood-filament-for-a-3d-printer-explained-compared/>
 24. KARIZ, Mirko, Milan SERNEK, Murčo OBUČINA a Manja Kitek KUZMAN. Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*. 2018, **14**, 135-140. ISSN 2352-4928. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016)
-

25. *Technical datasheet woodFill* [online]. Belfeld: colorFabb, 2018 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_woodFill.pdf
26. *Stringing or Oozing* [online]. Cincinnati: Simplify3D, 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/stringing-or-oozing/>
27. *Wood Filament* [online]. Menifee: 3DWithUs, 2020 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://3dwithus.com/wood-filament>
28. SAENZ, F., C. OTAROLA, K. VALLADARES a J. ROJAS. Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K. *Additive Manufacturing*. 2021, **39**, 101841. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101841>
29. *Olejování dřeva* [online]. Ostrava: ADLER Czech, 2012 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.adler-colorshop.com/cz/tipy/olejovani-dreva>
30. FAN, Chunli, Rui CUI, Wangwei LU, Haiyan CHEN, Minglong YUAN a Yuyue QIN. Effect of high pressure treatment on properties and nano-Ag migration of PLA-based food packaging film. *Polymer Testing*. 2019, **76**, 73-81. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.03.005>
31. *PLA/PHA BLUE GREY* [online]. Belfeld: colorFabb, 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/blue-grey>
32. *EASY PLA filament červený 1,75mm FIBERLOGY 850G* [online]. Brno: Materialpro3d, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/pla-1-75/easy-pla-filament-cerveny-1-75mm-fiberlogy-850g/>
33. *WOOD filament přírodní 2,85mm FIBERLOGY 750G* [online]. Brno: Materialpro3d, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/wood/wood-filament-prirodni-2-85mm-fiberlogy-750g/>
34. *PLA - 1,75 mm - Cloudy Grey - 1000 g* [online]. Praha: FUEL INVEST, SE, 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://printwithsmile.cz/cs/pla/305-pla-175-mm-cloudy-grey-1000-g-8594196450166.html>
35. *PLA Wood 450 g - 1,75 mm* [online]. Praha: FUEL INVEST, SE, 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://printwithsmile.cz/cs/pla-natural-fibers/276-pla-wood-450-g-175-mm-8594196455031.html>
36. Stark, Nicole M.; Rowlands, Robert E. 2003 [cit. 2021-5-13]. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and fiber science*. Vol. 35, no. 2 (2003): Pages 167-174

37. *Databáze komerčních dřevin* [online]. Presov: DREVARI.SK, 2003 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.drevari.cz/wood-species>
38. MALDAS, D., B. V. KOKTA a C. DANEALU. Thermoplastic composites of polystyrene: Effect of different wood species on mechanical properties: Effect of different wood species on mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley, 1989/08/05, **38**(3), 413-439. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/app.1989.070380303>
39. MIGNEAULT, Sébastien, Ahmed KOUBAA, Fouad ERCHIQI, Abdelkader CHAALA, Karl ENGLUND, Cornelia KRAUSE a Michael WOLCOTT. Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley, 2008/10/15, **110**(2), 1085-1092. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/app.28720>
40. HUANG, Yerong, Sandra LÖSCHKE a Gwénaëlle PROUST. In the mix: The effect of wood composition on the 3D printability and mechanical performance of wood-plastic composites: The effect of wood composition on the 3D printability and mechanical performance of wood-plastic composites. *Composites Part C: Open Access*. 2021, **5**, 100140. ISSN 2666-6820. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100140>
41. WIMMER, Rupert, Bernhard STEYRER, Josef WOESS, Tim KODDENBERG a Norbert MUNDIGLER. 3D PRINTING AND WOOD. *Pro Ligno*. 2015/12/14, **11**, 144-149.
42. BLEDZKI, A.K., M. LETMAN, A. VIKSNE a L. RENCE. A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre—PP composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005, **36**(6), 789-797. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.10.029>
43. GUO, Rui, Zechun REN, Hongjie BI, Yongming SONG a Min XU. Effect of toughening agents on the properties of poplar wood flour/poly (lactic acid) composites fabricated with Fused Deposition Modeling. *European Polymer Journal*. 2018, **107**, 34-45. ISSN 0014-3057. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.07.035>
44. LE DUIGOU, A., M. CASTRO, R. BEVAN a N. MARTIN. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*. 2016, **96**, 106-114. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>
45. *3D Benchy Download* [online]. Halmstad: Creative Tools, 2015 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.3dbenchy.com/download/>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ABS		Akrylonitril butadien styren
ASA		Akrylonitril styren akrylát
F	N	Silové zatížení
FDM		Fused Deposition Modeling
PET		Polyethylentereftalát
PET-G		Polyethylentereftalát – glykol
PLA		Kyselina polymléčná
S	mm ²	Plocha vzorku
TPU		termoplastický polyuretan
3D		Trojrozměrný
a	mm	Šířka vzorku
a _{nom}	mm	Nominální délka hrany
b	mm	Výška vzorku
n		Počet hodnot
\bar{x}		Aritmetický průměr
\tilde{x}		Medián
x _i		Hodnota měření
x _{n/2}		Prostřední naměřená hodnota zdola
x _{(n/2)+1}		Prostřední naměřená hodnota shora
σ	mm	Odchylka
T	MPa	Pevnost v tahu